

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DEL CONCRETO
OBTENIDO A PARTIR DE LA ACTIVACIÓN ALCALINA DE CENIZA VOLANTE**

ANDRES LEONARDO PULIDO LÓPEZ

506725

ANGIE JULIANA RODRÍGUEZ GÓMEZ

506604

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

ALTERNATIVA DE INVESTIGACIÓN

BOGOTÁ D.C.

2020

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO
OBTENIDO A PARTIR DE LA ACTIVACIÓN ALCALINA DE CENIZA VOLANTE**

ANDRÉS LEONARDO PULIDO LÓPEZ
506725
ANGIE JULIANA RODRÍGUEZ GÓMEZ
506604

Trabajo de investigación para optar por el título de ingeniero civil

Director
CARLOS PASTRAN
Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
ALTERNATIVA DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ D.C.
2020



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

Nota de Aceptación

Director de investigación
Ing. Carlos Gregorio Pastrán Beltrán

Evaluador 1
Ing. Abraham Ruiz Vásquez

Evaluador 2
Ing. Carlos Julio Cartagena Linares

Bogotá D.C. Mayo de 2020

Este proyecto se lo dedico a mi madre por su apoyo, su tiempo y comprensión en este proceso de formación, a mi padre que hoy está en el cielo, quien siempre quiso verme realizada como una gran profesional, y hoy puedo con certeza decirle desde lo profundo de mi corazón que todos los esfuerzos invertidos en este proceso, empiezan a tener frutos.

Juliana Rodríguez

Dedico este trabajo de grado a la memoria de Evelin, que a pesar de no estar entre nosotros ahora, permaneces con alegría en cada uno de nuestros corazones, quien con tu forma ser, tu sencillez como ser humano y tu perseverancia, cultivaste en mi un aprecio importante por la Vida.

También dedico este esfuerzo a mi Esposa, quien fue la primera persona que me impulso y apoyo a comenzar esta etapa, que a pesar de las circunstancias llenas mi vida de amor, alegría y convicción para poder concluir a satisfacción este camino, y que gracias a tu compañía, paciencia y comprensión me ayudaste a superar cada obstáculo.

A mis padres y a mis suegros, quienes siempre me apoyaron incondicionalmente en cada momento de mi carrera.

Andrés Pulido

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi familia por todo su apoyo durante mi proceso de formación, por estar en cada momento en el que lo he necesitado, dándome mensajes de aliento para avanzar siempre en cada paso dado. En especial a mi madre quien siempre ha estado y me ha tendido la mano en cada momento, por darme siempre su amor y decirme que no podría desfallecer, a mi hermana quien siempre me molestaba por tener poco tiempo, pero que hoy al igual que mi madre se siente muy orgullosa por los logros que he alcanzado, le agradezco a ella por apoyarme en todo y no abandonarme, por siempre darme animo en momentos difíciles.

A mi padre que por cuestiones de la vida hoy está en el cielo, sé que siempre me ve y está cada día en mi corazón, fue la persona que más me impulsó hasta donde pudo para darme ánimo y aliento de seguir con esta hermosa profesión, ahora el construye en el cielo y yo construyo en la tierra.

Agradezco también a mis compañeros de carrera, por participar con sus aportes en el desarrollo de este proyecto, en donde cada mensaje de fortaleza fue muy significativo para seguir siempre adelante con los propósitos propuestos desde el inicio de esta carrera, por las ayudas que nos brindaron también para llevar a cabo este proceso, en especial a mi compañero Andrés quien ha sido siempre un apoyo incondicional.

Al grupo docente por los conocimientos impartidos, los cuales fueron de mucha ayuda para el desarrollo de esta investigación, a nuestro asesor el Ing. Carlos Pastrán, quien nos abrió todo su conocimiento para poder darle rumbo a este proceso y lograr los resultados esperados en medio de todas las dificultades presentadas.

Angie Juliana Rodríguez Gómez

Desde el momento en que comencé a desarrollar este proyecto de investigación, tuve presente que el trabajo mancomunado era lo más importante para tener éxito no solo en la vida académica o laboral, sino también en el ámbito personal. Es por eso que agradezco principalmente a Dios, por darme la oportunidad de llevar a cabo todos mis planes y metas de forma satisfactoria a lo largo de esta etapa.

Por otro lado, agradezco la colaboración del ingeniero Carlos Gregorio Pastrán, quien, con su amplio conocimiento en el ámbito de la ingeniería civil, permitió fundamentar, desarrollar y encaminar gran parte de los procesos requeridos para la elaboración de este proyecto.

A mi compañera de proyecto y futura colega, Juliana, por la comprensión, apoyo y conocimiento brindados en toda la carrera y sobretodo en la colaboración en este trabajo.

A los profesionales de laboratorio, que, a pesar de las circunstancias, permitieron abrir sus espacios en la medida de lo posible para el desarrollo de ensayos y pruebas de laboratorio, a todos los ingenieros y docentes que aportaron cada uno un granito de arena para enriquecer mis conocimientos, también agradezco a todos mis compañeros de estudio los cuales permitieron aportar experiencias, ideas, intelecto, valores y cooperación, y no menos importante, a la Universidad Católica de Colombia la cual me abrió las puertas y me brindo gran parte de las herramientas para poder cumplir con cada una de las exigencias de formación propuestas.

A mis padres Gilma y Rafael por darme la vida y a mi hermano Juan preocuparse siempre por llevarme por el camino correcto.

A mi esposa y compañera de vida, Luisana, por su apoyo incondicional en todos los momentos precisos y por aportar siempre ideas y sugerencias que permitieron mejorar mis labores.

A mis suegros Aleyda y Luis Carlos, a mi cuñada Malorys, y sobre todo a Evelin, que aun que ya no se encuentre entre nosotros, la llevamos siempre presente en nuestros corazones, a Todos ellos, les agradezco por brindarme su apoyo en todos ámbitos tanto morales, éticos y económicos, siempre aportando buenos deseos y propósitos para mi formación como persona y como profesional.

Andrés Leonardo Pulido López

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	16
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GENERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	18
3.2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	19
4. ALCANCES Y LIMITACIONES	20
4.1 ALCANCES	20
4.2 LIMITACIONES	20
5. MARCO TEÓRICO	21
5.1 GENERALIDADES DEL CEMENTO PORTLAND	21
5.2 CENIZA VOLANTE	23
5.3 GENERALIDADES DEL CEMENTO DE ACTIVACIÓN ALCALINA	24
5.4 MEDIO AMBIENTE	27
6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	28
6.1 MATERIALES	28
6.1.1 Cemento Portland	28
6.1.2 Ceniza volante	28
6.1.3 Agregados	30
6.1.4 Activadores alcalinos	33
6.2 PRESUPUESTO	34
6.3 ESTIMACIÓN DE TIEMPOS PARA ENSAYOS DE LABORATORIO	35
6.4 DISEÑO DE MEZCLA	36
6.4.1 Diseño de mezcla para concreto a base de cemento portland	36
6.4.2 Diseño de mezcla para concreto a base de cemento de activación alcalina	37
6.5 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES	39
6.5.1 Elaboración de probetas de concreto a base de cemento Portland.....	40

6.5.2 Elaboración de probetas de concreto a base de Cemento de activación alcalina	43
7. RESULTADOS	45
7.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	45
7.1.1 Resistencia a compresión probetas a base de Cemento Portland	45
7.1.2 Resistencia a compresión probetas a base de Cemento de activación alcalina.....	48
7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
7.2.1 Concreto a base de Cemento Portland	52
7.2.2 Concreto a base de Cemento de activación alcalina.....	53
7.2.3 Análisis comparativo de los resultados entre muestras patrón a base de cemento Portland y las muestras a base de ceniza volante.....	54
CONCLUSIONES.....	56
RECOMENDACIONES.....	57
BIBLIOGRAFÍA.....	58
ANEXOS	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de Ceniza Volante	23
Tabla 2. Granulometría de los agregados	32
Tabla 3. Presupuesto.....	34
Tabla 4. Relación de tiempo de prácticas de laboratorio ejecutadas.....	35
Tabla 5. Resumen de procedimiento para diseño de mezcla concreto a base de cemento Portland.	36
Tabla 6. Diseño de mezcla de concreto a base de cemento Portland.	37
Tabla 7. Diseño de mezcla concreto a base de cemento de activación alcalina	38
Tabla 8. Ajuste Logarítmico de Datos	47
Tabla 9. Tabla resumen de los resultados obtenidos y consultados.....	54

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Proceso de producción del cemento Portland.....	21
Ilustración 2. Diagrama Triangular de $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	24
Ilustración 3. Vista 3D de la cadena molecular del gel N-A-S-H.....	25
Ilustración 4. Cemento Holcim	28
Ilustración 5. Ceniza - Termoeléctrica Coltejer.....	29
Ilustración 6. Composición química típica de las Cenizas Volante	29
Ilustración 7. Agregados Groncol.....	30
Ilustración 8. Caracterización de los agregados pétreos.....	31
Ilustración 9. Curva Granulométrica.....	32
Ilustración 10. Proporciones de las mezclas para concreto.....	38
Ilustración 11. Probetas a base de cemento portland	39
Ilustración 12. Probetas a base de ceniza volante	39
Ilustración 13. Mezclado de material.....	40
Ilustración 14. Llenado de cilindros capa 1	41
Ilustración 15. Llenado de cilindros capa 2	41
Ilustración 16. Llenado de cilindros capa 3	42
Ilustración 17. Mezcla en seco se ceniza y agregados	43
Ilustración 18. Solución de hidróxido de sodio y agua.....	43
Ilustración 19. Mezcla cementos alcalinos	44
Ilustración 20. Muestras en el horno	44
Ilustración 21. Resultado de ensayos a compresión muestras 1,2 y 3 a 12, 14 y 31 días.	45
Ilustración 22. Gráfica Resistencia a la Compresión del Concreto	46
Ilustración 23. Gráfica Resistencia a la Compresión del Concreto con base en resultados obtenidos de SGS LABORATORIOS CONTECON URBAR.	47
Ilustración 24. Dosificación y curado de muestras H-FAN y H-FAW	48
Ilustración 25. Gráfica de resistencia a la compresión de muestras H-FAN	49
Ilustración 26. Gráfica de resistencia a la compresión, horas - días.....	50
Ilustración 27. Cuadro de proporciones de mezcla de geopolímeros.	51
Ilustración 28. Resistencias a compresión de muestra G6 de mortero a base de cementos alcalinos.	52
Ilustración 29. Esquema de los modelos de fracturas típicos.....	53

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Formato de estimación de Consumo de Laboratorio para Proyectos	62
---	----

GLOSARIO

CEMENTO PORTLAND: Material compuesto principalmente por silicatos de calcio, que, al entrar en contacto con el agua, forma una masa homogénea que sufre un proceso de fraguado y endurecimiento.

CENIZA VOLANTE: Residuo sólido que se obtiene mediante el proceso de combustión del carbón, especialmente generado por las termoeléctricas.

HIDROXIDO DE SODIO: También conocido como soda caustica, es un sólido blanco cristalino, el cual reacciona al entrar en contacto con el agua, suele ser muy corrosivo.

ACTIVACIÓN ALCALINA: Proceso mediante el cual se produce una transformación total o parcial de los cementos, generando interesantes propiedades mecánicas.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: Es la resultante de las tensiones o presiones que existen dentro de un sólido deformable o medio continuo.

MATERIAL CEMENTANTE: Aquel que tiene las propiedades de adhesión y cohesión requeridas para unir agregados y conformar una masa.

ANTRACITA: La antracita es el carbón mineral más metamórfico y el que presenta mayor contenido en carbono. Es de color negro a gris acero con un lustre brillante.

BITUMEN O BITUMINOSO: El betún o bitumen es una mezcla de sustancias orgánicas altamente viscosa, negra, de alta densidad completamente soluble en disulfuro de carbono y compuesta principalmente por hidrocarburos aromáticos policíclicos.

XRF: Técnica analítica de fluorescencia de rayos X, utilizada para determinar la composición química que la ceniza.

XRD: Técnica analítica de Cristalografía de rayos X, utilizada para determinar la morfología que la ceniza.

RESUMEN

En vista de los avances desarrollados en el ámbito de la construcción como el aprovechamiento de subproductos industriales tales como la ceniza volante, la escoria de alto horno, entre otras, de las cuales se han realizado investigaciones de propiedades similares al cemento Portland. Es por eso que en el presente proyecto se toma como objeto de estudio la ceniza volante como precursor principal para la elaboración de concretos de activación alcalina en donde se evidencian, según resultados de ensayos existentes, mejores propiedades mecánicas de este tipo de concretos en donde se pueden alcanzar resistencias superiores a 50 MPa con el uso de soluciones alcalinas como el Hidróxido de Sodio (NaOH) a una concentración de 8 a 10 Moles, o, en algunos casos, complementándolo con el uso de Silicato de Sodio (Na_2SiO_3) para mejorar la resistencia a compresión. Por consiguiente, se evidencian relaciones de Activador Alcalino – Material Cementante entre los 0.37 a 0.60 ideales para proporcionar dichos resultados. Adicional a ello se debe contemplar en el proceso de diseño de las muestras los tiempos y temperaturas de curado en horno, las cuales oscilan entre los 80 y 100°C durante un periodo aproximado de 24 horas, permitiendo una reducción en el tiempo para que las muestras alcancen una mayor resistencia.

Palabras clave: Ceniza volante, Concretos de activación alcalina, Activador alcalino, Resistencia a la compresión.

ABSTRACT

In view of the advances developed in the field of construction such as the use of industrial by-products such as fly ash, blast furnace slag, among others, for which research on properties similar to Portland cement has been carried out. That is why, in this project, fly ash is taken as the object of study as the main precursor for the elaboration of alkaline-activated concretes where, according to the results of existing tests, better mechanical properties of this type of concrete are evidenced where they can reach strengths greater than 50 MPa with the use of alkaline solutions such as Sodium Hydroxide (NaOH) at a concentration of 8 to 10 Moles, or, in some cases, complementing it with the use of Sodium Silicate (Na_2SiO_3) to improve the compressive strength. Therefore, alkaline activator-cementitious material ratios are evident between 0.37 to 0.60, ideal to provide these results. In addition to this, the oven curing times and temperatures must be considered in the sample design process, which range between 80 and 100°C for an approximate period of 24 hours, allowing a reduction in the time for the samples to reach greater resistance.

Key words: Fly ash, Alkaline activating concrete, Alkaline activator, Compressive strength.

1. INTRODUCCIÓN

En el sector de la construcción es indispensable el conocimiento, producción y manejo adecuado de los materiales debido a que gran parte de las estructuras en el mundo buscan que estas sean económicas, estéticas y funcionales con el fin de satisfacer las necesidades de una ciudad o un país, otorgando a su vez importantes formas de desarrollo. En consecuencia, es posible resaltar el papel que cumple el concreto como material más utilizado en este sector, destacado por sus propiedades mecánicas, su fácil producción y su buen comportamiento con otros materiales como el acero. Sin embargo, para poder hablar de concreto, es necesario conocer a fondo los componentes primarios que conforman este conglomerado, como lo son el agregado fino, el agua y el cemento Portland, donde este último se considera como uno de los aglomerantes más versátiles que existen ⁸, destacado por sus importantes propiedades físico – mecánicas como el fraguado o endurecimiento hidráulico el cual produce simultáneamente una liberación de energía en forma de calor denominada reacción exotérmica.

En la actualidad, el cemento portland posee una relación importante entre precio y calidad, otorgando al sector de la construcción una participación económica del 10% a nivel mundial ¹⁴. Por otro lado, se encuentra que la producción de cemento impacta de forma negativa al medio ambiente debido a las altas producciones de CO₂ las cuales contribuyen al aumento de Gases de Efecto Invernadero (GEI) ¹⁸. Es por esto que varias de las investigaciones que se han realizado a nivel mundial donde buscan aprovechar las propiedades de componentes desechados por hornos de fundición de acero donde se producen importantes cantidades de desechos como la ceniza volante utilizada por su alto contenido de aluminosilicatos para producir materiales que proporcionen mejores propiedades mecánicas, minimicen el gasto energético y generen menor contaminación a la atmosfera como sucede con el cemento portland.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los concretos a base de cemento Portland y cemento de activación alcalina.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar una mezcla de concreto hidráulico con base en cemento portland de acuerdo al método ACI 211.1 para alcanzar una resistencia específica f'_c de 21 MPa.
- Establecer un procedimiento para lograr la activación alcalina de ceniza volante a evaluar, con base en la cual se propondrá un diseño teórico-práctico que permita alcanzar una resistencia específica f'_c de 21 MPa.
- Realizar ensayos de compresión de las muestras correspondientes a base de cemento portland y comparar con los resultados encontrados en investigaciones realizadas para concretos a base de ceniza volante.
- Analizar los resultados obtenidos a partir de los ensayos e investigaciones realizados para establecer viabilidades en las propiedades de las dos clases de materiales cementantes.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El uso de nuevos materiales cementantes han sido uno de las discusiones más relevantes en los últimos años donde se busca que no solo se generen cada vez menores cantidades de contaminantes al medio ambiente, sino desarrollar materiales que permitan competir con el tradicional cemento portland, buscando que las propiedades físico-mecánicas sean similares o mejores que las tradicionales, permitiendo que concretos como los H.U.A.R. (Concretos de Ultra de Alta Resistencia) que consisten en modificación de agregados como la arena para ser reemplazadas por arena con alto contenido de cuarzo⁶, abran más campos de investigación relacionados con este tipo de materiales.

Es por esto que las últimas investigaciones acerca del cemento de activación alcalina han logrado dar un acercamiento a un posible diseño de mezcla, esto con el fin de parametrizar la dosificación de componentes para conformar un concreto de resistencia definida, es decir conocer que cantidad de materiales, en qué proporción se deben mezclar para su obtención y las ventajas que conlleva su utilización e implementación.

Por consiguiente, es necesario conocer las propiedades de los materiales y en particular las del tipo de cemento en cuestión, para ello se debe entender inicialmente que, para el funcionamiento o activación de este tipo de cemento, es necesario utilizar claramente, compuestos alcalinos como el hidróxido de sodio (NaOH) principalmente, para que estos puedan reaccionar químicamente con los aluminosilicatos presentes en la ceniza volante generada por la combustión del carbón¹⁹ para que así se pueda conformar la pasta cementante adecuada para un diseño de mezcla en particular. Sin embargo, como se mencionaba anteriormente, es necesario conocer de fondo el proceso, las características, las especificaciones, propiedades, comportamientos de las materias primas involucradas para la elaboración de un cemento de activación alcalina y la viabilidad de este nuevo material en el sector de la construcción.

¿Vale la pena incursionar en Colombia en un material como el Cemento de Activación Alcalina como alternativa al uso permanente del Cemento Portland en la industria de la construcción?

3.2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

En sus comienzos, en el siglo XIX en Alemania, el cemento Portland, caracterizado como cemento hidráulico debido a su capacidad de reaccionar en presencia de agua y viento, se encontraba como material predominante para la construcción donde sus ventajas como base de conglomerantes hidráulicos eran apropiadas⁷. Posteriormente su etapa de innovación no llegó sino hasta más de la mitad del siglo XX, donde se comenzó a estudiar sobre otras formas para la producción de cementos basados en sus propiedades intrínsecas como lo es su composición mineralógica.

Por lo tanto, se ha tratado desde entonces encontrar alternativas en este material con el objetivo de obtener un producto accesible, aprovechable, manejable, asequible y utilizable en obras de infraestructura. Por consiguiente, se observa que los subproductos como la ceniza volante poseen tanto ventajas como desventajas debido a que podrían en ciertos casos poseer elementos deseables como los aluminosilicatos, manganeso, hierro, óxidos entre otros, y elementos no deseables como el magnesio, vanadio, fósforo, germanio y titanio, estos últimos en bajas proporciones⁷. Sin embargo, en los elementos considerados no deseables por Carvajal (2012), están los elementos alcalinos o activadores alcalinos los cuales tuvieron un buen comportamiento químico con los aluminosilicatos presentes en estas escorias independientemente si existía o no presencia de calcio³. Adicional a esto se encontró que este tipo de cementos varían dependiendo del tipo de escoria obtenida que se encuentra en función de la temperatura en que se lleve a cabo estos procesos, es decir, si se tiene escorias de tipo vítrea y tipo cristalizada⁷ de la cual estas últimas servirán principalmente para analizar en primera instancia a los cementos alcalinos.

Lo anterior, permite indagar que se tuvieron que realizar diversos estudios detallados tanto a nivel químico como físicos con el fin de obtener resultados positivos y de esta forma implementar una fase de experimentación en la industria de la construcción.

4. ALCANCES Y LIMITACIONES

4.1 ALCANCES

- El proyecto tiene como alcance realizar las investigaciones y análisis correspondientes a lo relacionado con las características físico-mecánicas que posee el concreto a base de cemento de activación alcalina.
- Con los resultados obtenidos a partir de la caracterización del cemento tipo portland y los análisis realizados en las investigaciones correspondientes al cemento de activación alcalina, se buscará comprobar y comparar sus propiedades para determinar la influencia en la elaboración del concreto para cada caso.

4.2 LIMITACIONES

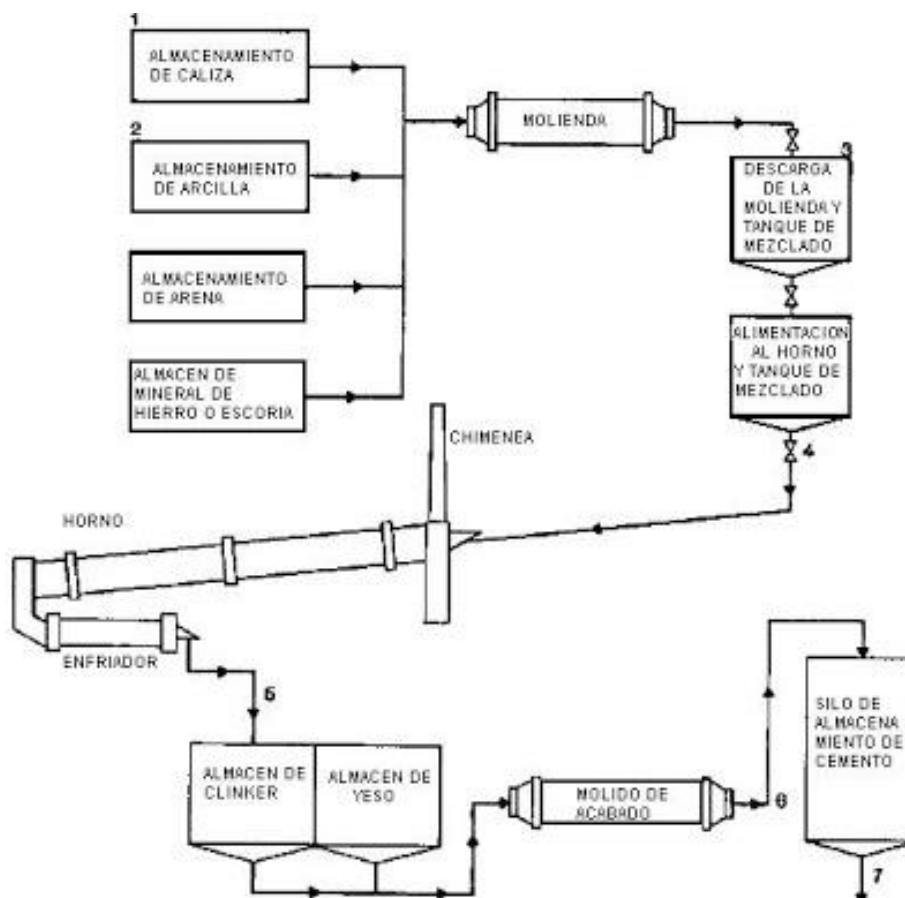
- La escasa capacidad logística que posee actualmente los laboratorios de la universidad limita a la disponibilidad de equipos y espacios para el desarrollo de las practicas lo que conlleva a reservarlos con bastante anticipación, es decir, altos tiempo de espera para disponer de ellos.
- Dadas las condiciones de salubridad presentadas actualmente a causa del COVID-19, se vio afectado el desarrollo de las prácticas de laboratorio, y asimismo la orientación de los resultados que se tenían previstos analizar.
- También se ha considerado como limitante el tiempo de ejecución, a pesar de que exista un cronograma propuesto, se presentaron retrasos y contratiempos que causo el cambio las fechas preestablecidas en cada etapa del proyecto.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 GENERALIDADES DEL CEMENTO PORTLAND

El cemento Portland sigue siendo uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción hoy en día tanto a nivel nacional como internacional, esencial para la elaboración de morteros de adherencia y por supuesto concretos de diversas clases y características. Es claro que la producción de este inicia a partir de la mezcla de minerales tales como el aluminio, la caliza, la alúmina y la sílice⁹, elementos presentes de forma abundante en la naturaleza, de allí su accesibilidad a la materia prima para su producción que van desde su explotación en canteras, trituración, clasificación, clinkerización y molienda final, tal y como se muestra en el siguiente esquema:

Ilustración 1. Proceso de producción del cemento Portland



Fuente: Yepes, V. (2010).

Ya producido, se destina a la combinación con otros materiales tales como agregados finos (Arenas), agregados gruesos (Gravas) y aditivos, estos en proporciones distintas según para lo que se desee utilizar. Adicional a eso se encuentra el agua como elemento clave para la activación de las propiedades aglutinantes y de endurecimiento (Fraguado) del cemento, es decir que posee un comportamiento hidráulico o reaccionante en presencia de agua, generando también una reacción exotérmica liberadora de energía en forma de calor, de allí la importancia del curado o aporte de agua adicional para evitar fisuración por cambios volumétricos debido a que en este proceso de curado se pierde un porcentaje considerable de agua.

En cuanto a sus propiedades físico-mecánicas se puede encontrar que el cemento Portland posee un peso específico entre 3.10 y 3.15 g/cm³ ⁹. un módulo de finura bastante alto que difiere del tiempo de molienda, esto garantiza mejor desempeño en la etapa de fraguado, el tamaño de partícula esta entre 10 y 0.5 micras de diámetro⁹, una consistencia variable que cambia a partir del tiempo que inicia el fraguado, siendo este último determinante para calcular tiempos de manejabilidad y trabajabilidad debido a que luego de reaccionar químicamente con el agua se debe colocar en el sitio correspondiente ya que de no hacerlo una vez endurecido queda totalmente inservible.

En consecuencia, para garantizar desde un comienzo la calidad, propiedades y características del cemento Portland, es importante resaltar que muchas de las empresas productoras de cemento en Colombia como Holcim, Argos y Cemex²¹ han considerado hoy en día que ambientalmente la producción de este material impacta de manera negativa debido a sus altas producciones de dióxido de carbono de aproximadamente 0.85 toneladas por cada tonelada de cemento producido³, el cual es arrojado a la atmosfera mayor concentración de GEI lo que conlleva a cambios climáticos, alteración del suelo y agotamiento de combustibles fósiles. Sin embargo, hoy en día se están buscando alternativas menos perjudiciales para el planeta como lo es el aprovechamiento de cenizas volantes y escorias de alto horno¹¹ como materia prima para suplir las propiedades que brinda el cemento Portland y así disminuir su producción.

5.2 CENIZA VOLANTE

Teniendo en cuenta los procesos energéticos utilizados para la producción de ceniza volante, al igual que los usos dados en el sector de la construcción que se establecen en gran escala desde el siglo XX²³, es indispensable conocer la procedencia de la ceniza ya que esto garantiza que posea unas características tanto físicas como químicas que permitan la interacción adecuada con diversos materiales ricos en sílice (Si), aluminio (Al) o calcio (Ca) como por ejemplo cuando se emplea para obtener una baja relación agua-material cementante²⁴ y a su vez permitiendo aportar una mejor resistencia a la compresión.

Esta clasificación se encuentra estandarizada internacionalmente por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) por sus siglas en inglés bajo la norma ASTM C 618 que clasifica a las cenizas según su composición química, origen de producción y características físicas²².

De forma homologa a la norma ASTM C 618, en Colombia existe la Norma Técnica Colombiana NTC 3493 en donde clasifica la ceniza volante de la siguiente forma:

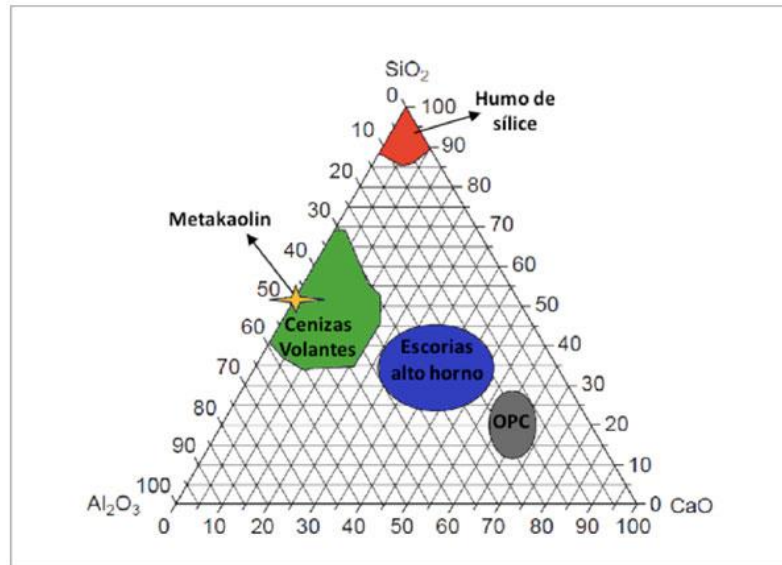
Tabla 1. Clasificación de Ceniza Volante

TIPO DE CENIZA	CLASIFICACIÓN		
	ORIGEN	COMPOSICIÓN	REQUERIMIENTOS QUÍMICOS
CLASE N	Cenizas volantes provenientes de puzolanas naturales como tierras diatomáceas ricas en sílice, cenizas volcánicas o piedra pómez ²²	Sílice-Aluminosas	N/A
CLASE F²³	Cenizas volantes son producto de la combustión de carbón con abundante contenido de antracita y bitumen	Sílice-Aluminosas	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq 70\%$
CLASE C²³	Cenizas volantes, al igual que la clase F son productos de combustión de carbón pero, en este caso, con bajos contenidos de antracita y bitumen.	Sulfo-Cálcicas	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \leq 50\%$

Fuente Autores

Comúnmente estas cenizas suelen combinarse con otros materiales ricos en calcio como el yeso o la anhidrita para establecer una estabilidad en los compuestos básicos que aporta el cemento Portland que son el silicio, calcio, aluminio representados en color verde en el siguiente diagrama¹⁷:

Ilustración 2. Diagrama Triangular de CaO-SiO₂-Al₂O₃



Fuente: Torres, M. (2017).

En este diagrama se observa la localización de la ceniza volante donde destacan principalmente contenidos de óxido de silicio SiO₂ y óxido de aluminio Al₂O₃ que este tipo de aluminosilicato posee, lo que ratifica el concepto de clasificación anteriormente mencionado.

5.3 GENERALIDADES DEL CEMENTO DE ACTIVACIÓN ALCALINA

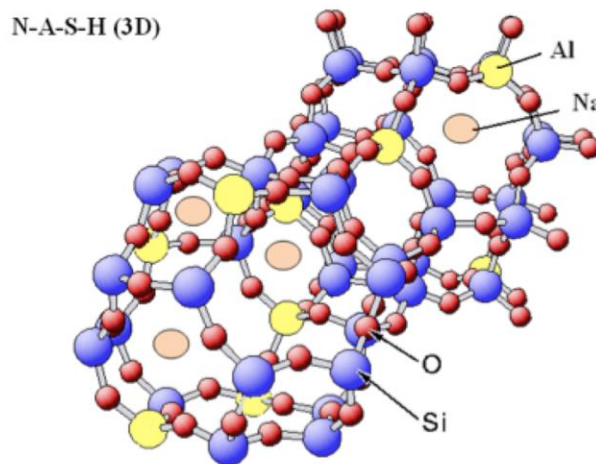
Como se mencionaba anteriormente, la combinación de ceniza volante para obtener mejores resultados en una pasta cementante, se ha venido utilizando desde el siglo pasado alrededor de la década de los años 1930, donde se lograban relaciones Ceniza/Cemento de más del 50%, donde su trabajabilidad y curado demostraron buenos resultados²⁵.

A partir de lo anterior surgieron diversas investigaciones como la realizada por Fernández Jiménez A. (2009) en donde destaca las mezclas para pasta cementante compuestas únicamente de ceniza volante y un compuesto alcalino tipo hidróxido R(OH) donde permitía la disolución del aluminio y la sílice presente en la ceniza para convertirla en un cemento de activación alcalina capaz de generar importantes ventajas frente al cemento Portland convencional como las siguientes [...] ¹⁵:

- Más rápidas y mayores resistencias mecánicas.
- Menor calor de hidratación.
- Mejor impermeabilidad.
- Mejor comportamiento frente a la carbonatación.
- Mayor resistencia al hielo-deshielo.
- Mayor resistencia a altas temperaturas.
- Mayor resistencia al ataque químico.
- Mayor resistencia de la interface árido-matriz.
- Mayor protección de las armaduras metálicas.
- Resistencia bacteriológica y biocida.
- Menor costo y mayor ahorro de energía.

No obstante, para poder hablar de cementos de activación alcalina es necesario definir el concepto de geopolímero, estos son el resultado de procesos químicos obtenidos a partir de una reacción entre un aluminosilicato y una sustancia con alto potencial alcalino capaz de ordenar y unificar una estructura amorfa como las encontradas en Al_2O_3 (Trióxido de Aluminio) y SiO_2 (Óxido de Silicio) para convertirla en una estructura molecular tetraédrica estable en forma de gel, denominado gel N-A-S-H el cual está formado a partir de un ion hidróxido como lo es el hidróxido de sodio (NaOH)²⁶.

Ilustración 3. Vista 3D de la cadena molecular del gel N-A-S-H



Fuente: Torres, M. (2017)

Por consiguiente, se busca que este cemento de activación alcalina cumpla las siguientes funciones¹⁵:

1. Acelerar la solubilización del material cementante.
2. Favorecer la formación de hidratos estables de baja solubilidad.
3. Favorecer la formación de una estructura compacta con esos hidratos formados.

Otro de los indicadores a tener en cuenta para la efectiva activación del cemento es el control en el pH de la disolución, esto con el fin de que facilite su solubilidad de iones Al^{+3} y Si^{+2} este proceso permite desarrollar la etapa de inducción correspondiente al proceso en el que la disolución activadora debe encontrarse en un entorno alcalino, es decir con un pH 13¹ otorgándole a la mezcla final las siguientes ventajas:

- Más rápidas y mayores resistencias mecánicas.
- Menor calor de hidratación.
- Mejor impermeabilidad.
- Mejor comportamiento frente a la carbonatación.
- Mayor resistencia al hielo-deshielo.
- Mayor resistencia a altas temperaturas.
- Mayor resistencia al ataque químico.
- Mayor resistencia de la interface árido-matriz.
- Mayor protección de las armaduras metálicas.
- Resistencia bacteriológica y biocida.
- Menor costo y mayor ahorro de energía.

Sin embargo, también en este proceso es encontrar desventajas directamente evidenciadas en el uso de cemento de activación alcalina¹⁵ como lo son:

- Fraguado más rápido.
- Mayor retracción y formación de microfisuras.
- Posibilidad de que se produzca mayor reacción áridoálcali.
- Mayor formación de eflorescencias.

5.4 MEDIO AMBIENTE

Tanto en la industria cementera como las principales centrales termoeléctricas del país y del mundo se han preocupado por las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero) como lo son el dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2) y sustancias agotadoras de ozono (SAO)¹¹ resultantes de su actividad las cuales afectan social, ambiental y económicamente tanto a la población circundante como el ecosistema allí presente.

En cuanto a la producción de cemento, se ha evidenciado según J. Cagiao (2010) que se han implementado varias estrategias para la disminución de contaminantes y a la su vez obtener una mejor eficiencia en los procesos de producción de esta materia prima, inicialmente se propone combinaciones de cemento con materiales suplementarios como la ceniza o la escoria¹¹, también proponen mejorar los procesos de clinkerización con el uso de combustibles alternativos evitando el uso excesivo de carbón bituminoso o antracítico.

En consecuencia, las industrias productoras de energía a base de combustibles fósiles como por ejemplo las termoeléctricas, están incentivando desde hace varias décadas el uso e implementación la ceniza volante, no como residuo, sino como subproducto de materias primas como el cemento Portland debido a sus altos contenidos de aluminosilicatos, que como ya se sabe, aportan mejores propiedades finales a este material. Para ello empresas como Termopaipa en el departamento de Boyacá, Colombia, buscan, bajo el análisis de su matriz de riesgo, la mitigación del impacto ambiental que genera particularmente la combustión de carbón empleado alternativas como el uso de carbón de alta eficiencia, realización de mantenimiento continuo a los equipos involucrados, manejo y disposición adecuado por operadores externos e instalación de filtros que impidan la salida de material particulado a la atmosfera, atrapándolo y facilitando su recolección²⁷.

Sin embargo, estos procesos deben estar en constante revisión de entidades medioambientales que regulen actividades, procesos, distribución y manejo de operaciones para que las consecuencias de la producción de estos productos impacten lo menos posible al entorno.

6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

6.1 MATERIALES

6.1.1 Cemento Portland

El cemento utilizado para este proyecto es Portland Tipo uso general (UG) proveniente de la compañía Holcim Boyacá con contenidos de caliza, puzolana natural no calcinada y yeso, cumple con las normativas NTC 121-14 e Icontec CSC-0008-1 según rotulación en el empaque.

Ilustración 4.Cemento Holcim

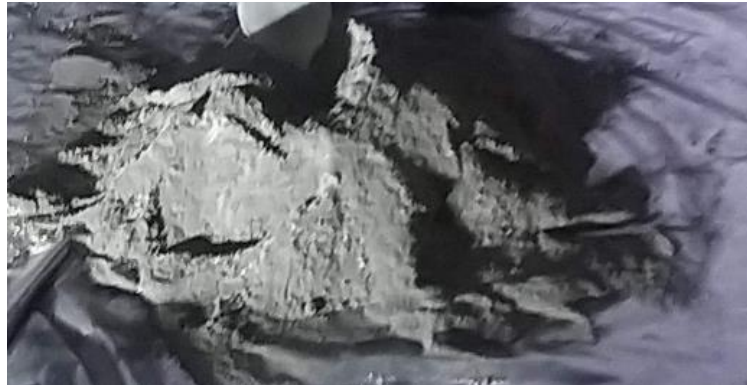


Fuente: Autores

6.1.2 Ceniza volante

Esta ceniza inicialmente se obtuvo de la compañía Brinsa S.A. localizada en el municipio de Cajicá, Cundinamarca, pero las cantidades suministradas por la compañía fueron insuficientes para las cantidades previstas para este proyecto. Sin embargo, se obtuvo una nueva ceniza proveniente de la empresa Colteger S.A. ubicada en Itagüí, Antioquia, en esta ceniza se observó una mejor apariencia y cumplía con las cantidades requeridas para la elaboración de las muestras.

Ilustración 5. Ceniza - Termoeléctrica Coltejer



Fuente: Autores

6.1.2.1 Caracterización de Ceniza volante

Según lo encontrado en investigaciones relacionadas al uso de las cenizas volantes, se encontró que en la zona del eje cafetero colombiano se evidencia una gran producción de cenizas volantes generadas a partir del consumo de carbón mineral para la producción de energía para gran parte de las fábricas de esa zona, entre las cuales se encuentra relacionada la empresa de textiles del departamento de Antioquia Coltejer S.A. con una producción de ceniza anual cercana al 8%³⁷.

Tradicionalmente este tipo de cenizas encontradas en esa zona cuenta con una composición química típica lo cual permite determinar su clasificación como se muestra a continuación:

Ilustración 6. Composición química típica de las Cenizas Volante

Parámetro	Clase F	Clase F	Clase C	Clase C
	Bajo Fe	Alto Fe	Alto Ca	Bajo Ca
SiO ₂	46 - 57	42 - 54	25 - 42	46 - 59
Al ₂ O ₃	18 - 29	16,5 - 24	15 - 21	14 - 22
Fe ₃ O ₃	6 - 16	16 - 24	5 - 10	5 - 13
CaO	1,8 - 5,5	1,3 - 3,8	17 - 32	8 - 16
MgO	0,7 - 2,1	0,3 - 1,2	4 - 12,5	3,2 - 4,9
K ₂ O	1,9 - 2,8	2,1 - 2,7	0,3 - 1,6	0,6 - 1,1
Na ₂ O	0,2 - 1,1	0,2 - 0,9	0,8 - 6,0	1,3 - 4,2
SO ₃	0,4 - 2,9	0,5 - 1,8	0,4 - 5,0	0,4 - 2,5
LOI	0,6 - 4,8	1,2 - 5,0	0,1 - 1,0	0,1 - 2,3
TiO ₂	1 - 2	1 - 1,5	< 1	< 1

Fuente Gómez, J. (2011)

A consecuencia de lo anterior, es indispensable realizar una adecuada caracterización de las propiedades físicas y químicas de la ceniza volante, dado que, como se menciona anteriormente, se puede clasificar en clase C o clase F, caracterización que no fue posible realizarle de ningún modo a la ceniza utilizada en este proyecto.

Sin embargo, en investigaciones relacionadas al uso de la ceniza volante como material precursor para el diseño de concreto a base de cementos de activación alcalina se encontró una serie de ensayos para determinar la morfología de las partículas de ceniza, el cual se efectúa por medio de un SEM (Microscopio Electrónico de Barrido, por sus siglas en inglés) donde se realiza un ensayo de Fluorescencia de Rayos X o XRF⁴⁰. Por otro lado, se realiza un ensayo para conocer la composición química de la ceniza, la cual se conoce por medio de un ensayo denominado Cristalografía de rayos X o XRD⁴¹.

Por consiguiente, gracias al uso de estos dos ensayos se puede determinar la composición y morfología que debe tener la ceniza para que sea clasificada según los parámetros mencionados anteriormente.

6.1.3 Agregados

En cuanto a los agregados se utilizó una arena de río proveniente de la empresa GRONCOL S.A.S. localizada en la ciudad de Bogotá, esta cumple, según proveedor, con la normativa NTC-174²⁸ como arena gruesa.

Ilustración 7. Agregados Groncol



Fuente: Autores

6.1.3.1 Caracterización de los Agregados

Inicialmente parte de los ensayos correspondientes a los agregados fueron suministrados por la compañía GRONCOL S.A.S., como se relaciona a continuación:

Ilustración 8. Caracterización de los agregados pétreos

CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS PÉTREOS			
ENSAYO	METODO	REQUISITO	RESULTADO
GRAVEDAD ESPECIFICA AGREGADO DE 1"	AASHTO T84-00 AASHTO T85 -91		2.51
GRAVEDAD ESP. APARENTE AGREGADO DE 1"			2.61
ADSORCION AGREGADO DE 1"			1.75%
GRAVEDAD ESPECIFICA AGREGADO DE 3/4"			2.52
GRAVEDAD ESP. APARENTE AGREGADO DE 3/4"			2.65
ADSORCION AGREGADO DE 3/4"			1.85
GRAVEDAD ESPECIFICA AGREGADO DE 1/2"			2.48
GRAVEDAD ESP. APARENTE AGREGADO DE 1/2"			2.65
ADSORCION AGREGADO DE 1/2"			2.20%
GRAVEDAD ESPECIFICA ARENA DE RIO			2.51
GRAVEDAD ESP. APARENTE ARENA DE RIO			2.64
ADSORCION ARENA DE RIO			1.68%
EQUIVALENTE DE ARENA	AASHTO T 176 - 02	50% minimo	76%
CARAS FRACTURADAS A UNA CARA	ASTM D 5821-01	75% minimo	87%
LIMITES LIQUIDO Y PLASTICO	ASTM D 4318-00	0%	0%
INDICE DE ALARGAMIENTO	NLT 354-91	10% maximo	9.50%
INDICE DE APLANAMIENTO	NLT 354-92	10% maximo	9.50%
ATAQUE DE SULFATO DE MAGNESIO	ASTM C 88-99a	18% maximo	12.90%
MICRODEVAL	AASHTO T 327-05	25% maximo	22.30%
10% DE FINOS (RESISTENCIA EN SECO)	DNER ME 096-98	90kN minimo	115kN
10% DE FINOS (RELACION HUMEDO/SECO)		75% minimo	83%
RESISTENCIA MAQUINA DE LOS ANGELES	AASHTO T 96-02	35% maximo	24.60%

Fuente: Groncol S.A.S.

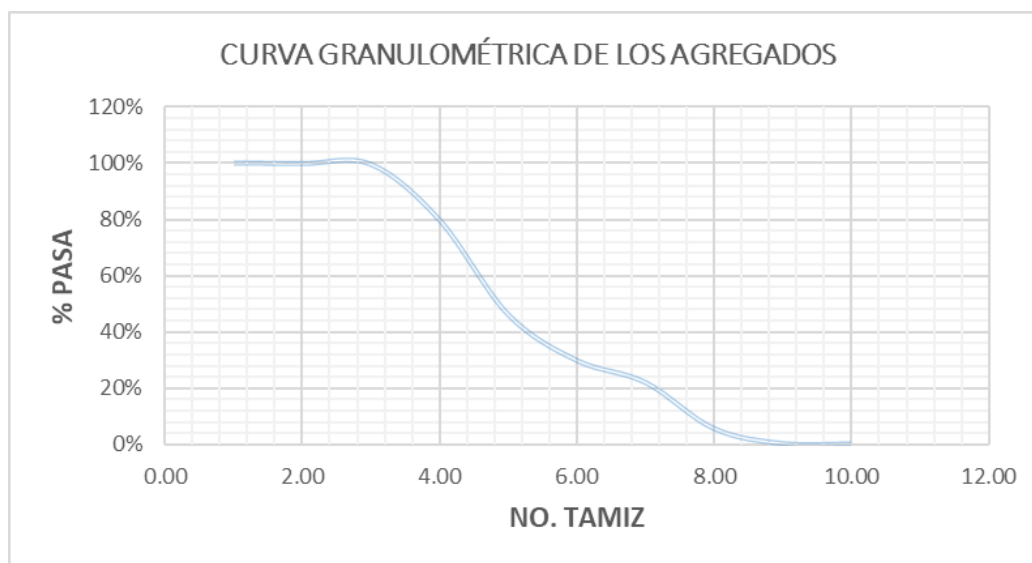
Por otro lado, se realizó granulometría a una muestra de arena proveniente de la empresa Groncol S.A.S. donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 2. Granulometría de los agregados

Tipo Tamiz	No. Tamiz	No. Tamiz (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
Agregado Grueso	1/2"	12.70	0	0%	0%	100%
	3/8"	9.53	10.2	0%	0%	100%
	No. 4	4.75	10.6	0%	0%	100%
Agregado Fino	No. 8	2.36	985.6	20%	20%	80%
	No. 16	1.18	1665.1	34%	54%	46%
	No. 30	0.60	808.7	16%	70%	30%
	No. 50	0.30	387.5	8%	78%	22%
	No. 100	0.15	814.0	16%	95%	5%
	No. 200	0.075	264.6	5%	100%	0%
	Fondo	Fondo	7.8	0%	100%	0%
		Σ	4954.1	100%		

Fuente Autores

Ilustración 9. Curva Granulométrica



Fuente Autores

6.1.4 Activadores alcalinos

Para este proyecto, con base en la literatura, se utilizó hidróxido de sodio (Soda Caustica o lejía de sosa) seco en escamas al 98% de pureza según proveedor Químicos Campota & Cía. Ltda. en la ciudad de Bogotá, sin embargo, por tratarse de producción a escala industrial se asume una pureza del 80% dado que no se registra por parte del proveedor el análisis de contenido en % de impurezas que pueda tener este producto resultado de diversos métodos de obtención **(Método de Solvay, Electrólisis cloro-álcali, Método Le Blanc, Electrólisis en fase fundida por el método de Dow, Método del diafragma o Método de la amalgama)** ²⁹.

NOTA: Por tratarse de un producto químico altamente corrosivo y nocivo para la salud, se tuvieron en cuenta todas las recomendaciones y precauciones requeridas para la manipulación según ficha técnica de seguridad proporcionada por Distribuidora de químicos industriales S.A.³⁰ Medellín, Colombia.

6.2 PRESUPUESTO

El presupuesto invertido en el desarrollo del proyecto fue el siguiente:

Tabla 3. Presupuesto

PRESUPUESTO PROPUESTA TRABAJO DE GRADO					
TITULO	EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DEL CONCRETO OBTENIDO A PARTIR DE LA ACTIVACIÓN ALCALINA DE CENIZA VOLANTE				
ESTUDIANTES				CODIGO	
ANGIE JULIANA RODRÍGUEZ GÓMEZ				506604	
ANDRÉS LEONARDO PULIDO LÓPEZ				506725	
INGRESOS					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VR. UNITARIO	VR. TOTAL
1	Auxilio patrocinado para la elaboración del trabajo	GL	1	\$ -	\$ -
2	Recursos propios	GL	1	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00
Subtotal					\$ 700,000.00
				Subtotal Ingresos	\$ 700,000.00
EGRESOS					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VR. UNITARIO	VR. TOTAL
1	Equipos y herramientas				
1.1	Alquiler camisas 4" x 8" - 6 und (5 días)	Día	30	\$ 900.00	\$ 27,000.00
1.2	Alquiler camisas 4" x 8" - 6 und (37 días)	Día	222	\$ 900.00	\$ 199,800.00
1.3	Alquiler molde metálico para viga 6" x 6" x 21" - 2 und (5 días)	Día	10	\$ 1,150.00	\$ 11,500.00
1.4	Cono Slump	Día	1	\$ 4,299.87	\$ 4,299.87
1.5	Varilla compactadora 5/8"	Und	1	\$ 25,400.00	\$ 25,400.00
1.6	Cucharon metálico	Und	1	\$ 15,000.00	\$ 15,000.00
1.7	Chapulín	Und	1	\$ 19,900.00	\$ 19,900.00
1.8	Baldes de construcción	Und	3	\$ 5,100.00	\$ 15,300.00
Subtotal					\$ 318,199.87
2	Materiales				
2.1	Cemento portlad	Bulto	1	\$ 30,345.00	\$ 30,345.00
2.2	Ceniza volante	Bulto	1	\$ 25,000.00	\$ 25,000.00
2.3	Hidroxido de Sodio	Kg	6	\$ 5,833.33	\$ 35,000.00
2.4	Agregado	Kg	40	\$ 1,500.00	\$ 60,000.00
2.5	Lonas	Und	5	\$ 50.00	\$ 250.00
Subtotal					\$ 60,250.00
3	Transporte				
3.1	Acarreo de ceniza - Brinza	Vj	1	\$ 150,000.00	\$ 150,000.00
3.2	Acarreo de ceniza - Coltejer	GL	1	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00
3.3	Transporte	GL	1	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00
Subtotal					\$ 245,000.00
4	Mano de obra				
4.1	Servicio de laboratorio para ensayo de cilindros a base de cemento portland	Und	6	\$ 6,069.00	\$ 36,414.00
Subtotal					\$ 36,414.00
				Subtotal Egresos	\$ 659,863.87
				Imprevistos (10%)	\$ 65,986.39
				Total	\$ 725,850.25

Fuente Autores

6.3 ESTIMACIÓN DE TIEMPOS PARA ENSAYOS DE LABORATORIO

Correspondiente al consumo de tiempo utilizado para los ensayos requeridos para el proyecto, se contempló inicialmente una estimación aproximada la cual fue revisada y aprobada por el ingeniero Carlos Pastrán y el técnico encargado de laboratorio Hugo Rondón, este se puede revisar en el anexo A.

Por consiguiente, se relaciona a continuación las prácticas realizadas en tiempo real para este proyecto:

Tabla 4. Relación de tiempo de prácticas de laboratorio ejecutadas

REPORTE DE TIEMPOS UTILIZADOS PARA PRACTICAS DE LABORATORIO			
ID	ENSAYO DE LABORATORIO	FECHA DE EJECUCIÓN	DURACIÓN (hrs)
1	Caracterización de agregados: Granulometría	15 de Marzo de 2020*	4
2	Calibración y dosificación de NaOH para activación de ceniza volante	28 de Febrero de 2020*	4
		12 de Marzo de 2020*	2
3	Secado y dosificación de agregado		2
4	Preparación y dosificación de activador alcalino	13 de Marzo de 2020*	2
5	Elaboración de muestras de cilindros 4" x 8" a base de cemento Portland		2
6	Elaboración de muestras de cilindros 4" x 8" a base de cemento de activación alcalina		2
7	Ensayos de resistencia a la compresión de muestras a base de cemento Portland	25 de Marzo al 13 de Abril de 2020**	2
TOTAL TIEMPO PARCIAL (hrs)			20

* El tiempo registrado en esta tabla corresponde a los ensayos de laboratorio ejecutados durante el tiempo presencial en las instalaciones de la universidad.

** Estos ensayos de laboratorio se realizaron de forma externa a la universidad por medio de la empresa SGS COLOMBIA S.A.S.

Fuente: Autores.

6.4 DISEÑO DE MEZCLA

6.4.1 Diseño de mezcla para concreto a base de cemento portland

Los diseños de mezcla planteados para los especímenes a base de cemento portland, se tuvo en cuenta principalmente la relación agua/material cementante (A/MC) junto con los siguientes criterios:

Para los diseños de mezcla planteados, se siguieron los lineamientos del método ACI 2.11.1, explicado por Sánchez, D. (2010).

Tabla 5. Resumen de procedimiento para diseño de mezcla concreto a base de cemento Portland.

DESCRIPCIÓN	DATOS OBTENIDOS	OBSERVACIONES
Volumen de Cilindros	0.0099 m ³	Obtenido de los 6 cilindros.
Asentamiento	89 mm	Tomado en sitio con el Cono de Abrams.
Contenido de aire	0.03%	⁹ Tomado Tabla 11.5.
Contenido de Agua	2.40 L	⁹ Tomado Tabla 11.7.
Relación Agua / Material cementate	0.58	⁹ Tomado Tabla 11.13.
Peso de Cemento	4.14 kg	Se toma en cuenta contenido de agua y relación A/MC
Peso Agregado grueso	6.74 kg	Se toma en cuenta el volumen compacto del agregado (b/bo) y la masa unitaria compacta (MUC). Según datos suministrados por el proveedor.
Peso Agregado Fino	9.48 kg	Se toma en cuenta la gravedad específica aparente de los agregados (Gag) y el volumen (Vag.f). Según datos suministrados por el proveedor.

Fuente: Autores.

Según la información de la tabla anterior, se define el diseño de mezcla final para concreto a base de cemento Portland.

Tabla 6. Diseño de mezcla de concreto a base de cemento Portland.

CEMENTO PORTLAND		Relación A/MC	0.58
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	DENSIDAD (Kg/M3)
Cemento	kg	4.14	3150 ³¹
Agregados	kg	16.22	1550 – 1600 ³²
Agua (15° C)	L	2.40	999.19

Fuente Autores

6.4.2 Diseño de mezcla para concreto a base de cemento de activación alcalina

Para determinar las proporciones de ceniza volante y activador alcalino, se realizó una serie de investigaciones relacionadas al diseño de este tipo de mezclas donde se utiliza ceniza volante como material cementante, allí se encontraron relaciones de activador alcalino/material cementante AA/MC hasta de un 0.60³⁴ arrojando buenos resultados a ensayos a compresión a 28 días logrando una resistencia aproximada de 24 MPa. Sin embargo, al tratarse de un modelo experimental donde aún no se encuentra estandarizadas las proporciones exactas para obtener una resistencia comparable con el diseño de concretos a base de cemento Portland, se decidió tomar lo sugerido por Cárdenas J. (2016) en donde primero se realiza una calibración de la concentración molar de una solución de NaOH, originalmente de 14M y posteriormente modificándola a 8M y 10M junto con la combinación del Silicato de Sodio al cual no se le cambió su concentración inicial para así conseguir un acercamiento a la activación ideal de la ceniza. En segundo lugar, se dosifico proporcionalmente las cantidades de ceniza, activadores alcalinos y agregados, con el fin de obtener una matriz cementante que permita obtener resultados esperados para estas dos situaciones. Para esto, se utilizaron las proporciones *FA8-BFS2* de activadores alcalinos, ceniza volante y agregados propuestos basados en la información proporcionada en la siguiente tabla:

Ilustración 10. Proporciones de las mezclas para concreto.

Tabla 2. Proporciones de las mezclas de concreto.

<i>Identificación</i>	<i>PC (kg/m³)</i>	<i>FA (kg/m³)</i>	<i>BFS (kg/m³)</i>	<i>Agregado grueso (kg/m³)</i>	<i>Agregado fino (kg/m³)</i>	<i>Agua (kg/m³)</i>	<i>Silicato de sodio (kg/m³)</i>	<i>Hidróxido de sodio (kg/m³)</i>	<i>Plastificante (kg/m³)</i>
PC8-FA2	316,3	79,1	-	880,1	732,9	197,7	19,8	-	4,0
PC8-BFS2	318,9	-	79,7	887,5	739,1	199,3	19,9	-	3,2
PC6-FA4	234,8	156,5	-	871,1	725,3	195,6	19,6	-	4,7
PC6-BFS4	238,6	-	159,1	885,2	737,1	198,8	19,9	-	4,1
FA8-BFS2	-	328,0	82,0	912,9	760,1	-	30,75	174,3	8,2
FA6-BFS4	-	248,0	165,3	920,2	766,2	-	30,75	174,3	8,2
FA4-BFS6	-	166,7	250,0	927,7	772,4	-	30,75	174,3	8,4
FA2-BFS8	-	84,0	336,1	935,3	778,8	-	30,75	174,3	8,4

Fuente Cárdenas, J. (2016)

Posteriormente, la calibración y ensayo de estas muestras, con base en el diseño anterior, permitió identificar una relación AA/MC de 0.53, cercana a la relacionada por Prieto, L (2018) la cual fue de 0.60, pero simultáneamente se encuentran en los resultados de los ensayos a compresión realizados a las muestras, datos de la evolución de la resistencia a través del tiempo, que no son adecuados. Por consiguiente, se replantean las condiciones de dosificación tanto de la concentración del hidróxido de sodio, se elimina la presencia del silicato de sodio, y se considera una relación AA/MC del 0.84 para el diseño definitivo de las muestras de concreto a base de ceniza volante.

Por tanto, para obtener unos mejores resultados de resistencia a la compresión, se estableció una mezcla con una solución de hidróxido de sodio, planteada según lo recomendado por Hoyos A. (2018), donde especifica una óptima liberación de energía a concentraciones entre los 8 y 10 Moles de únicamente utilizando como activador alcalino el NaOH, para lo que se decide usar, una concentración de NaOH a 9M y una pureza del 80%, quedando como diseño definitivo la siguiente dosificación:

Tabla 7. Diseño de mezcla concreto a base de cemento de activación alcalina

CENIZA VOLANTE		Relación AA/MC	0.84
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	DENSIDAD (Kg/M3)
Ceniza	kg	7.920	2160 ¹²
Agregados	kg	24.310	1550 – 1600 ³²
NaOH	kg	3.003	2130 ³³
Agua (15° C)	L	3.673	999.19

Fuente Autores

6.5 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES

Para la elaboración de los especímenes se contemplaron dos fases de fabricación. La primera comprendía las probetas a base de cemento portland y la segunda corresponde a las probetas a base de ceniza volante, esto con el fin de poder evaluar de forma más clara los diseños de mezcla implementados para cada caso.

Ilustración 11. Probetas a base de cemento portland



Fuente Autores

Ilustración 12. Probetas a base de ceniza volante



Fuente Autores

6.5.1 Elaboración de probetas de concreto a base de cemento Portland

6.5.1.1 Proceso de elaboración

Para el proceso de mezcla, colocación y curado de los especímenes a base de cemento Portland se utilizaron los parámetros correspondientes establecidos en la norma técnica Colombia NTC 1377 (2020). Para este caso se realiza una dosificación del material que va a ser utilizado para la elaboración de las probetas según diseños anteriormente mencionados, para lo cual se procede a realizar un mezclado en seco para unificar todos los materiales, este proceso se realiza con ayuda de herramientas de mano correspondientes. Posteriormente se procede a agregarle la cantidad de agua según el diseño propuesto y finalmente se realiza nuevamente el proceso anterior hasta obtener una mezcla homogénea.

Ilustración 13. Mezclado de material



Fuente Autores

Luego de ello, se procede verter la mezcla en los cilindros metálicos de dimensiones 4" x 8" (10 x 20 cm), para esto se hace uso de un palustre. Para el llenado de los mismos, se hace en secuencia de 3 capas. Para cada una se introduce una varilla metálica estandarizada golpeando 25 veces en forma de espiral de afuera hacia adentro procurando no sobrepasar el espesor de cada capa o golpear el fondo del molde y simultáneamente se golpea el exterior del cilindro con un mazo de goma, esto con el fin de extraer el exceso de aire que queda dentro de la mezcla.

Ilustración 14. Llenado de cilindros capa 1



Fuente: Autores

Ilustración 15. Llenado de cilindros capa 2



Fuente: Autores

Ilustración 16. Llenado de cilindros capa 3



Fuente: Autores

Finalmente se enrasa la superficie de cada muestra para retirar los excesos de material que puedan quedar en los cilindros y finalmente se procede a dejar estas muestras encofrados por un tiempo aproximado entre 16 y 30 horas.

6.5.1.2 Curado

Pasadas las 24 horas de la fundida de las muestras, se desencofran los cilindros para luego realizar el proceso de curando sumergiéndolas en un tanque de agua, hasta cumplir las edades de ensayo respectivas.

6.5.1.3 Ensayo de resistencia a compresión

En cuanto a los ensayos de compresión de las muestras diseñadas se solicitó, de forma externa, a la empresa SGS COLOMBIA S.A.S., o más conocida como LABORATORIOS CONTECON URBAR para fallar las muestras a 12, 14 y 31 días.

6.5.2 Elaboración de probetas de concreto a base de Cemento de activación alcalina

6.5.2.1 Proceso de elaboración

Para la elaboración de estas probetas se hace siguiendo los mismos parámetros de las muestras a base de cemento Portland especificadas en el numeral 6.4.1.1 a excepción de la preparación del activador alcalino y el proceso de curado, el cual se prepara con escamas de hidróxido de sodio y agua. Para esta preparación se sigue un proceso riguroso, dado que esta mezcla genera una reacción exotérmica que alcanza una temperatura de 85°C aproximadamente, la cual que es potencialmente peligrosa al contacto con la piel, para ello se hace uso de los implementos de protección personal necesarios para su manipulación.

Una vez obtenida la solución, se procede a agregar en pequeñas proporciones a la mezcla homogénea seca de ceniza y agregados hasta lograr una adecuada manejabilidad. Por consiguiente, se prepara las muestras en proporciones de 1 cilindro a la vez para evitar desperdicios de material dado que se evidencio un fraguado rápido en la mezcla.

Ilustración 17. Mezcla en seco se ceniza y agregados



Fuente Autores

Ilustración 18. Solución de hidróxido de sodio y agua



Fuente autores

Ilustración 19. Mezcla cementos alcalinos



Fuente autores

6.5.2.2 Curado

Una vez se cuentan con todos los cilindros encofrados, se procede a ingresarlos inmediatamente al horno a una temperatura de 110°C por 48 horas, homologado a lo presentado por Provis, J & Van Deventer, J. (2014) donde sugiere un tiempo de curado alrededor de 100°C . Cumplido este tiempo se colocan las probetas a temperatura ambiente hasta las edades de ensayo respectivas.

Ilustración 20. Muestras en el horno



Fuente autores

6.5.2.3 Ensayo de resistencia a compresión

Para este caso no se lograron hacer ensayos de compresión debido a que, desde el mes de marzo del presente año, se restringió el ingreso a la universidad, debido a las condiciones de salubridad presentadas.

7. RESULTADOS

En cuanto a los resultados obtenidos a partir de los ensayos a compresión para las probetas a base de cemento Portland, al igual que los datos de resultados obtenidos de las investigaciones relacionadas para las probetas a base de ceniza volante, se realiza un análisis comparativo de los dos tipos de mezcla diseñados.

7.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

7.1.1 Resistencia a compresión probetas a base de Cemento Portland

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión se realizaron sobre los cilindros a edades de 12, 14 y 31 días, diseñados según numeral 6.3.1, como se muestran en el siguiente informe emitido por SGS COLOMBIA S.A.S.

Ilustración 21. Resultado de ensayos a compresión muestras 1,2 y 3 a 12, 14 y 31 días.



LABORATORIOS

CONTECON URBAR

INGENIEROS CONSULTORES

Diagonal 24C # 96-85

Tel: 57-1-756 2656

ENSAYO A LA COMPRESION DE CILINDROS DE

CONCRETO / MORTERO

NTC 673 / INV E-410-13 / NTC 3546

Consulta General de Muestras

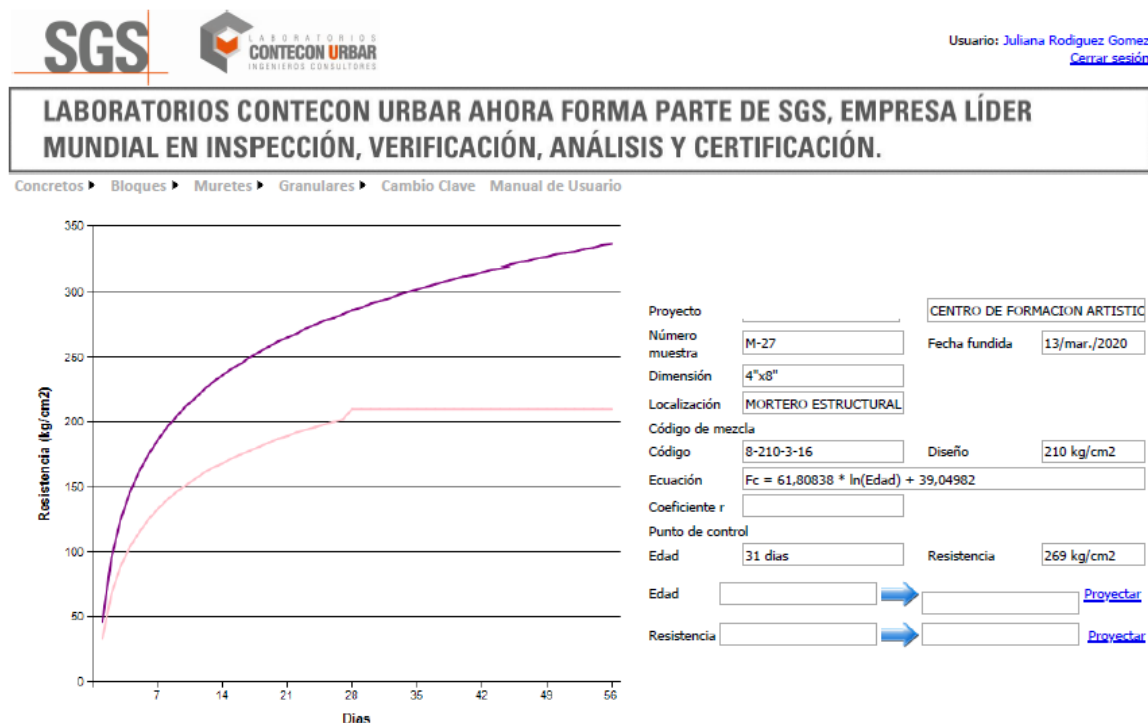
Muestra:	M-27	MORTERO ESTRUCTURAL				Fecha de muestreo: 13/mar./2020 3:00PM			
Dimensión:	4"x8"	Código de mezcla: 8-210-3-16				Resistencia nominal: 20.6 MPa			
Asentamiento:	890 mm	Peso unitario:	0	Kg/m3	Frete:	0 - n.a.	Contenido aire: 0.0%		
Temperatura:	0,0 °C	Planta:	n.a.		Mixer:	n.a.	Remisión:		
Observaciones:									

Edad	F. Ensayo	kg/cm ²	psi	MPa	%	Prensa	Tipo Falla	Observación	Calificación
12	25/mar./2020	164	2,330	16.0	78	n.a.	Fractura diagonal		
12	25/mar./2020	131	1,860	12.8	62	n.a.	Fracturas en los lados superior o inferior		Proyección Bajo
14	27/mar./2020	189	2,690	18.6	90	LAB-03-0	Fractura diagonal		
14	27/mar./2020	171	2,430	16.7	81	LAB-03-0	Fractura diagonal		
31	13/abr./2020	269	3,820	26.3	128	n.a.	Fractura diagonal		
31	13/abr./2020	236	3,350	23.1	112	n.a.	Fractura diaagonal		

Los tipos de falla corresponden a los indicados en la norma NTC 673 figura 2 "Esquema de los Modelos de Fractura Típicos"

Fuente: SGS LABORATORIOS CONTECON URBAR. Departamento de Laboratorios. Informe técnico abril 14 de 2020. Bogotá D.C.

Ilustración 22. Gráfica Resistencia a la Compresión del Concreto



Fuente: SGS LABORATORIOS CONTECON URBAR. Departamento de Laboratorios. Informe técnico abril 14 de 2020. Bogotá D.C.

Con base en la información proporcionada por la empresa CONTECON URBAR, se toma la ecuación para el ajuste logarítmico para realizar la proyección de los resultados a 7, 14 y 28 días, consignados de la siguiente forma:

Tabla 8. Ajuste Logarítmico de Datos

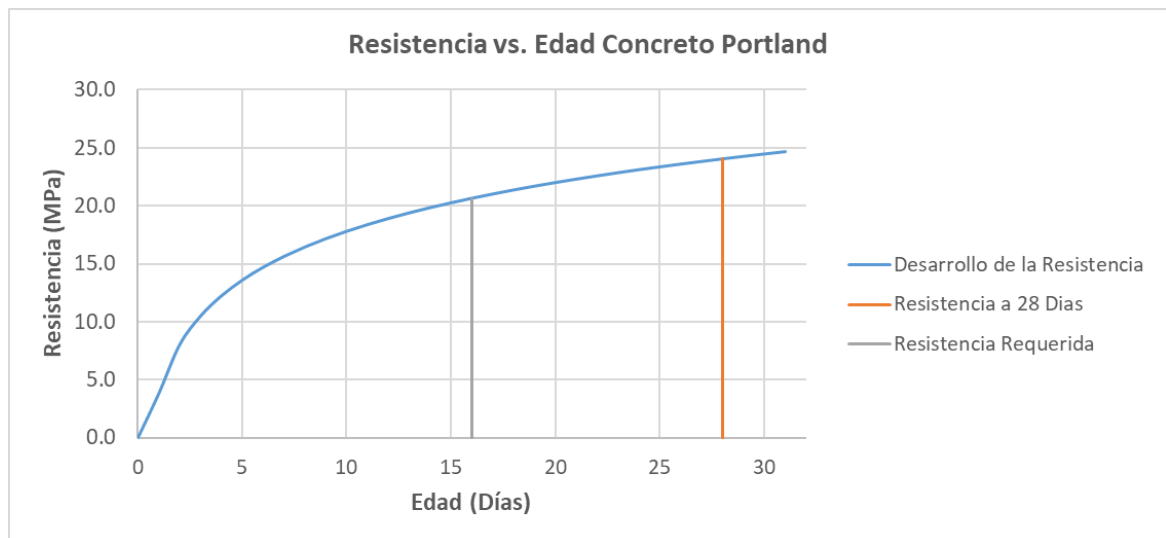
Ajuste Logarítmico de Datos			
$F_c = 61.80838 \cdot \ln(x) + 39.04982$			
Edad x	Resultados Promedio		
(días)	PSI	MPa	Kg/cm ²
7	2266	15.6	159.3
14	2875	19.8	202.2
16	2993	20.6	210.4
28	3485	24.0	245.0
31	3574	24.6	251.3

Edad en la que alcanza resistencia requerida.

Fuente: Autores.

Adicional a los datos anteriormente presentados, se realiza la gráfica correspondiente a la evolución de la resistencia con respecto a las edades de curado.

Ilustración 23. Gráfica Resistencia a la Compresión del Concreto con base en resultados obtenidos de SGS LABORATORIOS CONTECON URBAR.



Fuente: Autores.

7.1.2 Resistencia a compresión probetas a base de Cemento de activación alcalina

Para la presentación de los resultados correspondientes a las muestras basadas en el cemento de activación alcalina, se tuvieron que consultar las fuentes bibliográficas existentes, dado que la situación sanitaria actual impidió la realización de los ensayos a las muestras elaboradas según numeral 6.4.2 las cuales se encontraban previamente programadas. Por consiguiente, la información encontrada permitió observar diversos métodos propuestos por los autores para la obtención de resultados positivos en cuanto a la resistencia a la compresión.

Inicialmente se encontró un diseño correspondiente a Fernández, A & Palomo, A. (2009), denominado H-FAN, donde establece ceniza volante tipo F como precursor inicial, una concentración de NaOH a 8M, uso de agregado tanto grueso como fino y una relación AA/MC de 0.45.

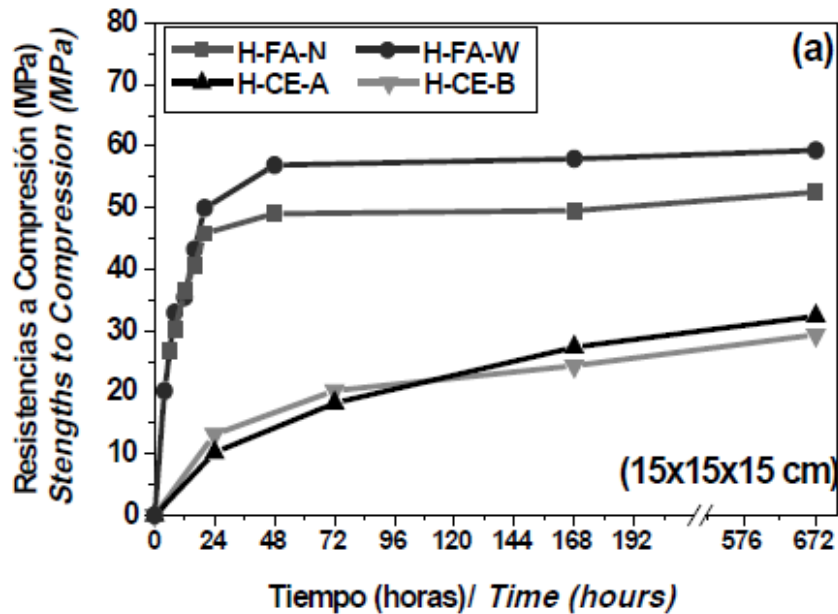
Ilustración 24. Dosificación y curado de muestras H-FAN y H-FAW

Nombre/ Name	Dosificación/Dosage (g /m ³)			Disolución/Dissolution		Condiciones de curado iniciales/ Initial Curing Conditions
	Árido/Aggregate (6/12 mm)	Arena/Sand (0/5mm)	Ceniza/Ash	Activador/Activator	L/C	
¹ H-FAN	828	1043	468	N	0.45	20h a 85°C y 98 % h.r.
¹ H-FAW	828	1043	468	W	0.55	20h a 85°C y 98 % h.r.

Fuente: Fernández, A & Palomo, A. (2009)

En cuanto el proceso de curado se encontró un tiempo estimado de 20 horas a una temperatura promedio de 85°C, lo que permitió conseguir una resistencia a la compresión cercana a 50 MPa a los 28 días posteriores su respectivo curado.

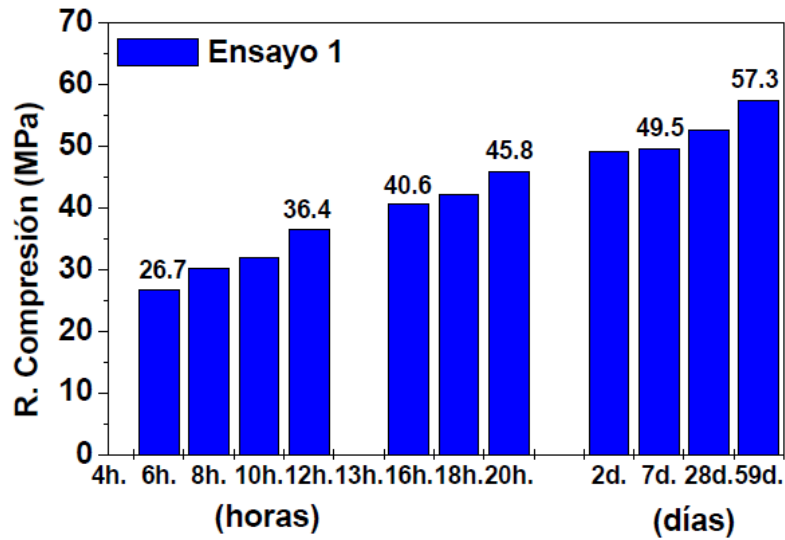
Ilustración 25. Gráfica de resistencia a la compresión de muestras H-FAN



Fuente: Fernández, A & Palomo, A. (2009)

Por otro lado, Criado, M. (2007) desarrollo un diseño de mezcla en donde también se hace uso de ceniza tipo F junto con una solución de NaOH a 8M, combinado ambos tipos de agregados (finos y gruesos) y utilizando una relación AA/MC de 0.37, para que finalmente llevara las muestras ya elaboradas a curado en horno a una temperatura entre los 85 y 90°C durante un tiempo aproximado de 20 horas y posteriormente dejadas a temperatura ambiente, alcanzando de esta forma una resistencia a la compresión de superior a los 55 MPa a los 28 días tal y como se evidencia en la siguiente gráfica:

Ilustración 26. Gráfica de resistencia a la compresión, horas - días



Fuente: Criado, M. (2007)

Y finalmente se encontró por parte de (Prieto, L. et. al., 2018) el uso de ceniza volante proveniente de una termoeléctrica donde aprueba parámetros para considerarla tipo F según lo mencionado por Muñoz, M. (2018). Por otro lado, se evidencia el uso de activador alcalino a una concentración molar de 8M, 10M y 12M de la cual es posible destacar la de 8M que corresponde a las concentraciones utilizadas anteriormente por otros autores. Adicionalmente, es importante destacar que este autor decide adicionar a su activador alcalino silicato de sodio a una relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ de 1, 1,50, 2 y 2,50 esto con el fin de obtener mejores resultados según investigaciones previas por parte del autor.

En cuanto al agregado, se usa para este caso únicamente, arena de río debidamente caracterizada. Posteriormente se encontraron relaciones AA/MC desde 0.40 hasta 0.60 según lo evidenciado en este cuadro resumen:

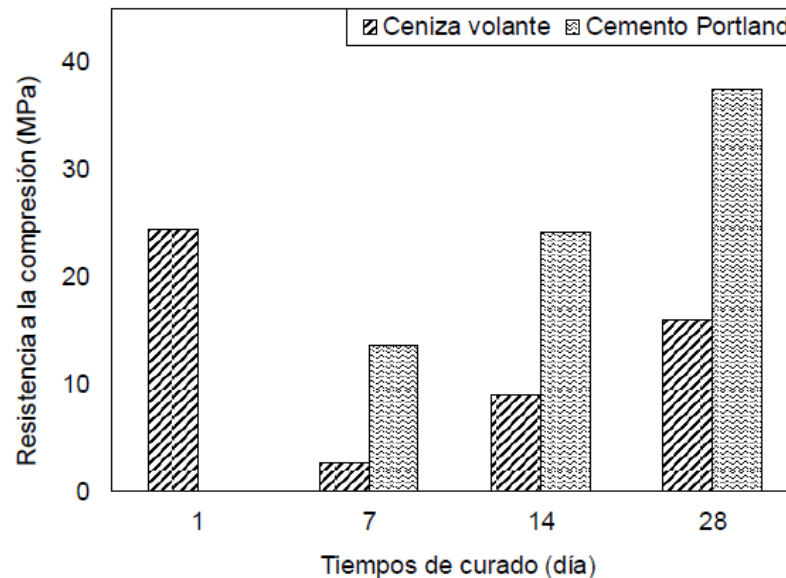
Ilustración 27. Cuadro de proporciones de mezcla de geopolímeros.

Muestra	Activador alcalino / ceniza volante	Na ₂ SiO ₃ / NaOH
G1	0,40	1
G2	0,45	
G3	0,50	
G4	0,60	
G5	0,40	1,50
G6	0,45	
G7	0,50	
G8	0,60	
G9	0,40	2
G10	0,45	
G11	0,50	
G12	0,60	
G13	0,40	2,50
G14	0,45	
G15	0,50	
G16	0,60	

Fuente: Prieto, L. & Cía. (2018)

Para las muestras anteriormente indicadas la que mostro mejor resultado a la resistencia a la compresión fue la muestra G6, la cual obtuvo una resistencia de 24,46 MPa en un tiempo de un día luego de pasar un proceso de curado a una temperatura constante de 80°C durante 24 horas, esto se evidencia en la dosificación usada en donde utilizan una relación AA/MC de 0.45 y una relación de Na₂SiO₃/NaOH del 1.50.

Ilustración 28. Resistencias a compresión de muestra G6 de mortero a base de cementos alcalinos.



Fuente: (Prieto, L. et. al., 2018)

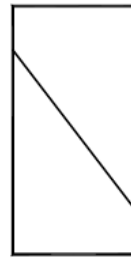
7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.2.1 Concreto a base de Cemento Portland

Se evidencia en el reporte presentado en el numeral 7.1.1, basado en el diseño de mezcla propuesto en el numeral 6.3.1, que las probetas falladas lograron a los 31 días de curado, un porcentaje de 120% de resistencia a la compresión, equivalente a 24.7 MPa, dado que, según uno de los objetivos planteados en este proyecto, se buscaba alcanzar una resistencia específica f'_c de 21 MPa, lo que indica que el diseño de mezcla planteado cumple con el requisito mínimo de diseño para este tipo de concretos.

Adicional a ello, se observa también que el tipo de falla producido al momento de ser aplicada la carga final fue de tipo 4, presentadas en la mayoría de las probetas ensayadas, lo cual corresponde, según la Norma Técnica Colombiana NTC 673, que al fallar cada una de las probetas se genera una fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos, tal como se observa en la siguiente imagen:

Ilustración 29. Esquema de los modelos de fracturas típicos



Tipo 4

Fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos; golpee suavemente con un martillo para distinguirla del Tipo 1

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 673 – Ensayo Resistente a Compresión. Figura 2

Este tipo de falla presentado se da mayormente por cortante en un plano inclinado a 45° y esto puede ser porque existe una combinación teórica de esfuerzos dentro de la matriz cementante, lo que visualmente corresponde a una falla típica encontrada en muestras de concreto a base de cemento Portland, corroborando su relación intrínseca con la forma y tamaño de las muestras¹³, lo que permite consecuentemente mejorar su resistencia a la compresión, la cual alcanzo a la edad de 28 días, un 20% más de la resistencia de diseño.

7.2.2 Concreto a base de Cemento de activación alcalina

Partiendo del planteamiento del diseño de mezcla según tabla 6, para el concreto a base de cemento de activación alcalina, se pueden relacionar algunos de los aspectos encontrados en los resultados anteriormente presentados para este caso.

Con lo referente a la concentración molar encontrada para cada caso fue entre los 8M y los 10M lo que permite encontrar una congruencia entre el planteamiento propuesto según el numeral 6.3.2, el cual fue de 9M. Sin embargo, en alguno de los casos revisados se evidencia una importante participación de una segunda sustancia activadora como lo es el silicato de sodio (Na_2SiO_3), el cual proporciona un mejoramiento en las propiedades mecánicas de cada muestra que las que se puedan encontrar únicamente usando NaOH ³⁴.

Por otro lado, se encontró que, en el uso de los agregados, solo (Prieto, L. et. al., 2018) utilizo arena como agregado, de la misma forma que se utilizó en el diseño de

mezcla propuesto en el numeral 6.3.2, y adicional a eso se evidencio una similitud amplia entre las relaciones AA/MC investigadas las cuales estuvieron entre los 0.37 y 0.60, una diferencia de 0.23 entre ellas, lo que permite asimilar el valor de 0.84 como máxima relación entre AA/MC propuesta para el diseño en cuestión.

Por consiguiente, se encontraron periodos de curado en horno entre 20 y 24 horas a un rango de temperatura que oscilaba entre los 80 y 90°C, valores alejados a los propuestos, los cuales fueron de 48 horas a 110°C pero que fueron cercanos a los mencionados por Provis, J & Van Deventer, J. (2014).

Finalmente, se evidencio un aumento significativo de la resistencia a la compresión con el uso de una matriz cementante con componentes agregados tanto finos como gruesos, dado que en los casos evaluados se encontraron resistencia entre los 50 a 55 MPa a 28 días del proceso de curado y una resistencia cercana a los 25 MPa con el uso de arena gruesa como agregado principal.

7.2.3 Análisis comparativo de los resultados entre muestras patrón a base de cemento Portland y las muestras a base de ceniza volante.

En cuanto a los aspectos más relevantes de las mezclas diseñadas y evaluadas, se realizó una tabla con los principales valores comparativos que se obtuvieron de las diferentes propuestas investigadas.

Tabla 9. Tabla resumen de los resultados obtenidos y consultados.

TIPO DE MEZCLA	Relación A/MC o AA/MC	Tipo de Agregado utilizado	Edad	Resistencia Requerida	Resistencia Final	Porcentaje alcanzado	Observaciones
	(Mpa)		(días)	(MPa)	(MPa)	(%)	
CEMENTO PORTLAND	0.51	Agrado Fino / Agregado Grueso	31	20.6	24.6	120%	Resultado original del ensayo
			28	20.6	24.0	117%	Se realiza ajuste logaritmico a 28 Dias
³⁸ CEMENTO ACT. ACALINA 1	0.45	Agrado Fino / Agregado Grueso	28	45.0	50.0	111%	Valores de diseño aproximados
³⁹ CEMENTO ACT. ACALINA 2	0.37	Agrado Fino / Agregado Grueso	28	50.0	55.0	110%	Valores nominales aproximados
³⁴ CEMENTO ACT. ACALINA 3	Promedio de 0.50	Agrado Fino	28	20.6	24.5	119%	Valores de diseño aproximados

Fuente: Autores.

En esta tabla se puede evidenciar un incremento promedio del 106.2% a la resistencia a la compresión de los ensayos realizados con ceniza volante (Mezcla 2 y 3) frente a la resistencia obtenida con relación a la muestra patrón, a base de cemento Portland (Mezcla 1). Adicional a esto, la mezcla 4 registró un aumento del 2.04% de resistencia frente a la obtenida en la mezcla patrón, es decir, obtuvo en menor tiempo la resistencia a la compresión requerida a la que fue diseñado.

Por otro lado, se observa que al diseñar un concreto a base de cemento alcalino con una matriz de agregado grueso y fino, sumado al proceso de curado al horno al que fueron sometidas todas muestras estudiadas, estas aumentan significativamente su resistencia a la compresión permitiendo superar el diseño propuesto logrado a partir de la muestra patrón a base de cemento Portland.

En consecuencia, se puede deducir que a pesar de que el proceso de curado en horno para el cemento a base de ceniza volante es más dispendioso al igual que la manejabilidad encontrada durante el proceso de activación, este tipo de concreto ofrece resistencias más altas aun en un corto periodo de tiempo de curado como los resultados obtenidos en la investigación realizada por Prieto, L. et. al., 2018.

CONCLUSIONES

Con base en el diseño de mezcla a base de ceniza volante propuesto, se logró realizar la activación del precursor, por medio del uso de NaOH a una concentración de 9M lo cual corresponde a lo evidenciado en las propuestas de diseño encontradas en investigaciones relacionadas anteriormente, corroborando el rango de concentración utilizado por la mayoría de los autores la cual se encontraba entre los 8M y 10M, debido a que en el primer acercamiento al proceso de activación se utilizó una concentración mayor a 10M causando que la resistencia final obtenida fuera menor a la esperada.

En cuanto a los resultados encontrados, se concluye que realizar el proceso de curado al horno a las muestras es indispensable para poder obtener las resistencias a compresión requeridas, dado que la interacción entre la pasta activada alcalinamente y el aumento de la temperatura permite que internamente los geopolímeros reaccionen de una forma más rápida según lo mencionado por (Prieto, L. et. al., 2018). Por tanto, el concreto a base de cemento Portland, el cual es curado tradicionalmente en agua, tarda más tiempo en conseguir su resistencia de diseño frente al concreto a base de cemento de activación alcalina.

Al revisar las concentraciones de NaOH para el proceso de activación de la ceniza, donde se observó que en todas de las investigaciones relacionadas se hicieron con éxito, se logró evidenciar que los rangos de relaciones AA/MC utilizadas estuvieron entre 0.37 y 0.60 lo que permite confirmar que si es posible utilizar una relación AA/MC baja para este proceso en comparación con la propuesta experimental, la cual fue del 0.84, causando a su vez que exista más consumo de solución alcalina y por consiguiente hace que sus costos de elaboración sean mayores.

Fue posible observar que, en los ensayos de resistencia a la compresión proyectados a una edad de 28 días, de la mezcla propuesta a base de cemento portland y las mezclas de ceniza volante consultadas, el uso de agregado grueso y fino aporta mejores resultados a la matriz cementante que utilizar únicamente arena como agregado precursor, dado que al combinar estos dos tipos de agregados con la pasta de material cementante permite que esta tenga mayor interfase de adherencia con los agregados gruesos ya que estos poseen una mayor resistencia a la compresión la cual normalmente debe ser superior a la resistencia de la pasta de material cementante⁹. Sin embargo, se puede evidenciar que a pesar de que los dos tipos de concretos utilizan la matriz de agregado fino y agregado grueso, el concreto a partir de ceniza volante presenta mejores resultados de resistencia a la compresión los cuales se encontraron en el orden de 50 a 55 MPa frente a 24 MPa correspondientes a la mezcla patrón.

RECOMENDACIONES

A modo experimental se han logrado importantes avances en cuanto al uso, aprovechamiento y estudio de las propiedades potenciales que puede llegar a tener la ceniza volante como material primario en la industria de la construcción. Sin embargo, para lograr la industrialización de este tipo de material es de suma importancia profundizar en los métodos de curado, dado que en los casos estudiados se hace uso de altas temperaturas para este proceso lo cual dificultaría en campo hacer uso de este método, por tanto, se podría incorporar, como alternativa, el uso de elementos prefabricados en procesos constructivos que relacionen el aprovechamiento de la ceniza volante.

Debido a la alta demanda de energía para la producción de cemento Portland y adicional a eso, los Gases de Efecto Invernadero (GEI) que estos procesos generan, se debiera contemplar la posibilidad de mitigar estos efectos aprovechando en uso en masa de la ceniza volante como precursor principal para la elaboración de concretos, dado que este material se obtiene a partir de la combustión de carbón mineral, lo que supone una reducción significativa en el impacto al medio ambiente así como la generación de menos GEI y un ahorro en el consumo de energía no renovable y una menor explotación mineral del suelo, teniendo en cuenta que la ceniza volante es un subproducto de un proceso industrial previo como en este caso, una central termoeléctrica.

Por otro lado, dado a los importantes avances que se han encontrado sobre el proceso de activación alcalina de este subproducto y el buen comportamiento mecánico que presenta en los ensayos de compresión estudiados a lo largo de estas últimas décadas, sería interesante que se desarrollaran metodologías y guías de estandarización para el manejo, procesos y uso eficiente de este material como materia prima en sector de la construcción incentivando de esta forma el uso de nuevos componentes en la industria cementera al igual que la generación de estudios que permitan la obtención de nuevos resultados a partir de mejores investigaciones de las que se han expuesto hasta el momento.

Finalmente, se recomienda establecer protocolos, planes de contingencia y control para el uso de NaOH como elemento principal para los procesos de activación de la ceniza, dado que al tratarse de una sustancia química peligrosa para la salud por sus efectos nocivos producidos por los vapores generados en la reacción química y a su vez los efectos corrosivos que pueden dañar cualquier tejido con el que tenga contacto, debe tener un manejo adecuado si se pretende maximizar el uso de este tipo de material cementante en la industria de la construcción.

BIBLIOGRAFÍA

A. Fernández Jiménez, F. P.-C. (2000). Cementos de escorias activados alcalinamente. Determinación del grado de reacción. Madrid - España: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). [1]

Fernandez Jiménez, A. P. (2009). Properties and uses of alkali cements. Ingeniería de Construcción RIC, 213-232. [2]

Carvajal, J. (2012). Evaluación de escorias de córdoba para su utilización en la industria del cemento portland. Medellín - Colombia: Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Minas. [3]

Junaid, M., Kayali, O. & Khennane, A (2012). A Mix Design Procedure for Alkali Activated Fly Ash-based Geopolymer Concretes. Conference Program, Beijing, China 2012, 143-150.

E. Rodríguez, S. B. (2008). Hormigón alternativo basado en escorias activadas alcalinamente. Materiales de construcción Ed. 291, 53-67. [5]

Espinoza, A. (2010). Estudio de dosificación de hormigón de ultra alta resistencia, basado en el empaquetamiento de los áridos. Madrid - España: Universidad Politécnica de Madrid. [6]

Fernández, A. (2000). Cementos de escorias activadas alcalinamente: Influencias de las variables y modelización del proceso. Madrid - España: Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja. [7]

Gustavo Valencia, D. A. (2016). Concretos de activación alcalina basados en subproductos industriales (Cenizas volantes y escorias de alto horno) expuestos a elevadas temperaturas. Cali: Universidad del Valle. [8]

Sánchez, D. (2010). Tecnología del concreto – tomo 1 materiales, propiedades y diseños de mezcla. ASOCRETO, Colección del concreto. [9]

INVIAS. (2013). Sección 400 - Concreto Hidráulico. Bogotá: INVIAS. [10]

Juan Cagiao, B. G. (2010). Huella ecológica del cemento. Coruña - España: Laboratorio de ingeniería sostenible. [11]

Hoyos, A. (2018). Evolución de la reacción y estructura del sistema porlandita - ceniza volante de carbón activado alcalinamente. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. [12]

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020). ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECIMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO. NTC 673-20. Colombia. [13].

Palomo, A. (16 de Marzo de 2010). Cementos alcalinos: El reto de una alternativa del cemento portland. Obtenido de YouTube: [youtube.com/watch?v=OB1A__ZHOP](https://www.youtube.com/watch?v=OB1A__ZHOP) [14]

Puertas, F. (2017). Hormigones de escorias activadas alcalinamente. Comportamiento mecánico y durable Madrid - España: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). [15]

Puertas, F. (13 de Marzo de 2013). Los geles CASH formados en las pastas de los cementos. Obtenido de YouTube: [youtube.com/watch?v=K74W4jggDz0](https://www.youtube.com/watch?v=K74W4jggDz0) [16]

Puertas, M. & Torres-Carrasco, M. (2017). Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: alkali activated cements or geopolymers. Ingeniería de Construcción RIC, 5-12. [17]

Putrón, P. (2015). Impactos ambientales asociados con el proceso de producción del concreto. Revista Enfoque 2015, 67-80. [18]

Suárez, J. F. (2016). Activación alcalina para mezclas secas. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. [19]

Susan Bernal, R. M. (2013). Alkali-activated materials: cementing a sustainable future. Ingeniería y competitividad, 201-223. [20]

Fernández, B. & Hernández, K. (2008). Diagnóstico de la industria del cemento en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas. Bogotá, Colombia Universidad de La Salle. [21]

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2017). CENIZAS VOLANTES Y PUZOLANAS NATURALES, CALCINADAS O CRUDAS, UTILIZADAS COMO ADITIVOS MINERALES EN EL CONCRETO DE CEMENTO PÓRTLAND. Sección Ingeniería Civil Y Arquitectura, 4-7. [22]

Muñoz, M. (2018). Caracterización geotécnica de cenizas volantes generadas a partir de la combustión del carbón en central termoeléctrica. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile. [23]

Huaquisto, S. & Belizario G. (2018). Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. revista investigación Altoandina. [24]

Provis, J & Van Deventer, J. (2014). Alkali-activated materials. University of Sheffield & University of Melbourne. [25]

Rosas, C, & Cía. (Noviembre de 2015). Estudio Físico, Químico y Microestructural De Geopolímeros Base Ceniza Volante. Universidad Autónoma de Sinaloa. [26]

Niño, C. (2018). GESTIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL: PROCESO DE GENERACIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES EN LA TERMOELÉCTRICA A BASE DE CARBÓN DEL MUNICIPIO DE PAIPA. Universidad De América, Colombia. [27]

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2000). ESPECIFICACIONES DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO. Sección Concreto, 5-12. [28]

Cesa, J. & Cía. (2005). Cátedra Industrias y Servicios: La Industria Química Básica. Universidad Nacional de Cuyo, Argentina. [29]

Distribuidora de químicos industriales S.A. (2013). SODA CAUSTICA 98 % Mín. Ficha Técnica NaOH, Medellín, Colombia. [30]

360 En concreto. (2020). Conociendo las propiedades físicas del cemento: ¿Qué y cómo? Cementos Argos, recurso Web <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/category/cemento/propiedades-físicas-del-cemento>. [31]

García, F. (2019). Tabla de materiales. Empresa Áridos García, recurso web <http://www.aridsgarcia.com/es/la-oficina-virtual/tabla-de-densidad-de-los-materiales> [32]

Hoja de seguridad NaOH. (2020). Densidad del Hidróxido de Sodio. Químicos Campota, Bogotá. [33]

Prieto, L. & Cía. (2018). Evaluación Mecánica y Ambiental del Uso de Ceniza Volante con Activación Alcalina como Alternativa de Reemplazo Total del Cemento en la Elaboración de Tabletas Prefabricadas. Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia. [34]

Cárdenas, J & Cía. (2016). Comportamiento mecánico de sistemas cementantes binarios (cemento portland – ceniza volante – escoria de alto horno). Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. [35]

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020). ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO PARA ENSAYOS DE LABORATORIO. NTC 1733-20. Colombia. [36].

Gómez, J. (2011). Aprovechamiento de cenizas de carbón mineral producidas en la industria local como material conglomerante en la construcción. Universidad de Medellín. Medellín, Colombia. [37]

Fernández, A & Palomo, A. (2009). Properties and uses of alkali cements. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). Madrid, España. [38]

Criado, M. (2007). Nuevos materiales cementantes basados en la activación alcalina de cenizas volantes. Caracterización de geles N-A-S-H en función del contenido de sílice soluble. Efecto del Na_2SO_4 . Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). Madrid, España. [39]

Lin, W. & Cía. (2019). A factorial experimental analysis of using wood fly ash as an alkaline activator along with coal fly ash for production of geopolymer-cementitious hybrids. National University of Singapore. Kent Ridge, Singapur. [40]

Ryu, G. & Cía. (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. , Korea Institute of Construction Technology. Gyeonggi, Corea del Sur. [41]

ANEXOS

ANEXO A. Formato de estimación de Consumo de Laboratorio para Proyectos

[illegible]